

ПРО ЗВ'ЯЗОК ВИКЛИКАНО ОТОАКУСТИЧНО ЕМІСІ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ
СЛУХУ ЛЮДИНИ

О. О. Зубченко

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут"

Проведено порівняльний аналіз даних суб'єктивно та об'єктивно аудіометрії. Встановлені наступні закономірності: залежність $\Delta f = 1/\Delta t$ від f_p , що визначена по сигналу затримано отоакустично емісії, кількісно співпадає з середньою залежністю (людей з різною чутливістю) ширини частотних груп, виміряно за суб'єктивною оцінкою гучності шуму; розділення спектра звуку на частотні інтегруючі групи відбувається в завитку внутрішнього вуха.

Використання імпульсно функції викликаного отоакустично емісії дає новий об'єктивний метод для точного визначення ширини частотних груп і об'єктивний інваріантний параметр норми внутрішнього вуха, що дозволяє доповнити скринінг слуху новонароджених і здійснювати моніторинг функціонального стану вуха.

Ключові слова: аудіометрія, отоакустична емісія, імпульсна функція.

О СВЯЗИ ВЫЗВАННОЙ ОТОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ И СВОЙСТВ СЛУХА
ЧЕЛОВЕКА

О. А. Зубченко

Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт"

Проведен сравнительный анализ данных субъективной и объективной аудиометрии. Установлены следующие закономерности: зависимость $\Delta f = 1/\Delta t$ от f_p , определенная по сигналу задержанной отоакустической эмиссии, количественно совпадает со средней зависимостью (людей с разной чувствительностью) ширины частотных групп, измеренной по субъективной оценке громкости шума; разделение спектра звука на частотные интегрирующие группы происходит в улитке внутреннего уха.

Использование импульсной функции вызванной отоакустической эмиссии дает новый объективный метод для точного определения ширины частотных групп и объективный инвариантный параметр нормы внутреннего уха, что позволяет дополнить скрининг слуха новорожденных и осуществлять мониторинг функционального состояния уха.

Ключевые слова: аудиометрия, акустическая эмиссия, импульсная функция.

ABOUT CORRELATION BETWEEN INDUCED OTOACOUSTIC EMISSION AND
PROPERTIES OF HUMAN HEARING

O. O. Zubchenko

National Technical University of Ukraine "Kyiv polytechnic Institute"

It was held a comparative analysis of subjective and objective audiometry. It was established the following compliance: $\Delta f = 1/\Delta t$ dependence on f_p , which is defined by the signal of delayed otoacoustic emissions, quantitatively coincides with the average dependency (people with different sensitivity) width of frequency groups, measured by subjective evaluation of noise volume; separation range of sound frequency integrating group is in the cochlea of the inner ear.

Using the pulse function induced of otoacoustic emission provides a new objective method to determine the exact width of the frequency bands and objective invariant setting standards of inner ear, allowing you to add newborn hearing screening and to monitor the functional state of the ear.

Key words: audiometry, acoustic emission, the pulse function.

Вступ. Розділення спектра звуку на частотні інтегруючі групи є однією з найважливіших властивостей слуху і функцій слухового аналізатора. Ця властивість полягає в тому, що якщо ширина смуги шуму не пе-

ревищує деякого критичного значення, то рівень гучності в цій смугі визначається лише загальною енергією шуму і абсолютно не залежить від характеру розподілу інтенсивності шуму в цій смугі: інтен-

сивність може бути розподілена рівномірно, може бути зосереджена в частині смуги або навіть сконцентрована в одному тоні, що збільшує відношення сигнал / шум і роздільне сприйняття ВЧ слабких на фоні НЧ сильних формант. У межах частотних груп акустичний аналізатор ніби інтегрує збудження, не враховуючи тонкої спектральної структури збуджуючої дії [1].

Метою даної роботи є визначення, на підставі порівняння даних суб'єктивної та об'єктивної аудіометрії, того, чим забезпечується розділення спектра на частотні групи: акустикою завитка або участю слухової іннервації (сенсоневральною системою).

Матеріали та методи дослідження. Частотні групи. Розглянемо результати експериментів з визначення залежності рівня гучності смуги шуму від його ширини [2]. Вони представляються у вигляді сімейства кривих рівної гучності порожнинного шуму із заданою середньою частотою f_{cp} . На рисунку 1 показано сімейство таких кривих, отриманих при середній частоті $f_{cp} = 1000$ Гц.

По осі абсцис відкладена ширина смуги Δf , по осі ординат – рівень інтенсивності смуги шуму, при якому досягається відчуття однієї і тієї ж гучності. Як бачимо, в смузі, ширина якої не перевищує 160 Гц,

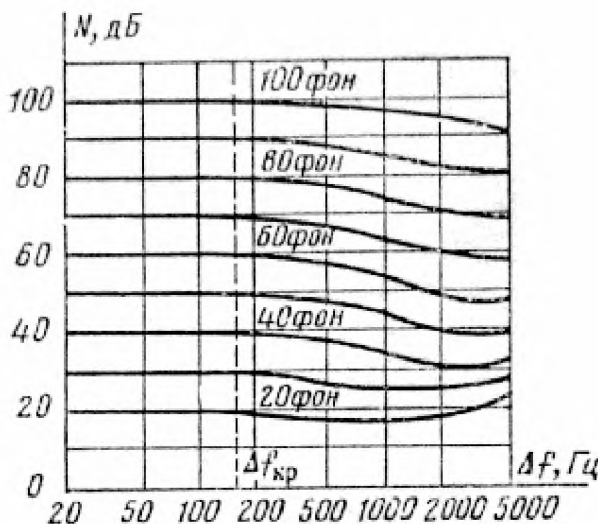


Рис. 1. Криві рівної гучності смуг шуму ($f_{cp} = 1000$ Гц).

В області частот нижче 500 Гц ширина частотних груп майже не залежить від частоти і становить приблизно 100 Гц. В області вище 500 Гц вона збільшується пропорційно частоті, тобто дотримується не абсолютна, а відносна сталість ширини смуги при значенні Δf_{cp} рівному 20% від середньої частоти.

для підтримки сталості рівня гучності потрібно зберігати незмінним і рівень інтенсивності. Для цього при збільшенні Δf треба зменшувати спектральну щільність шуму в стільки ж разів, у скільки збільшується ширина смуги. При подальшому розширенні Δf рівень інтенсивності смуги доводиться зменшувати, тобто спектральна щільність повинна зменшуватися в більше число разів, ніж збільшується ширина смуги. Така картина спостерігається при всіх рівнях гучності.

При інших значеннях середньої частоти f_{cp} має місце точно така ж закономірність, з тією різницею, що ширина смуги незмінного рівня інтенсивності стає іншою.

На підставі цих даних можна зробити висновок, що якщо ширина смуги шуму не перевищує деякого критичного значення $\Delta f_{кр}$, то рівень гучності в цій смузі визначається лише загальною енергією шуму і абсолютно не залежить від характеру розподілу інтенсивності шуму в цій смузі: інтенсивність може бути розподілена рівномірно, може бути зосереджена в частині смуги або навіть сконцентрована в одному тоні. Такі смуги отримали назву частотних груп. Як вже зазначалося, ширина частотної групи не залежить від рівня шуму. Однак вона має частотну залежність, що наведена на рисунку 2.

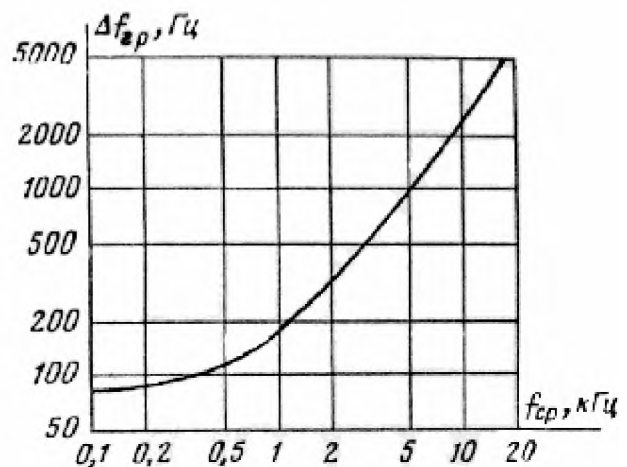


Рис. 2. Частотна залежність ширини частотних груп.

Якщо поєднати частотні групи в один ряд, то в діапазоні від 20 Гц до 16 кГц розмістяться 24 частотні групи [2].

У роботі [3] запропоновано смуговий ряд, заснований на експериментальних даних. При цьому в якості точки відліку прийнята група, розташована в області середніх частот, ширина якої виміряна з найбільшою

точністю. Однак у цій же роботі зазначено, що орган слуху може утворювати частотні групи на будь-якій ділянці шкали частот, причому ширина групи залежить тільки від значення її центральної частоти. Отже, довільний вибір початку формування смугового ряду з великою ймовірністю призведе до спотвореного його подання. Крім цього, запропонований ряд обмежений зверху частотою 16 кГц, що пояснюється значним розсіюванням чутливості слуху серед різних людей в області частот вище 16 кГц, де принципово неможливо забезпечити необхідну точність вимірювань. Вирішити обидва ці питання можна лише за допомогою аналітичного виразу, що описує залежність ширини частотної групи від частоти, що породжує її тон [1].

Проаналізуємо насамперед інтегруючи здатності слуху в частотній області. Щоб отримати аналітичну залежність ширини частотної групи ΔF від значення утворюючого її тону f_m , скористаємося експериментальними даними, отриманими для людей з різною чутливістю слуху. Завдання вирішується шляхом зіставлення результату деякої функції $\Delta Fc(f_m)$. З цієї метою зручно скористатися одним із методів регресійного аналізу – лінійної регресії загального вигляду. При цьому критерієм точності наближення функції до середньої для «хмари» статистичних даних приймається коефіцієнт кореляції R^2 . Причому, чим ближче R^2 до одиниці, тим точніше наближення.

В результаті застосування лінійної регресії загального вигляду була отримана функція (1):

$$\Delta Fc(f_m) = 10^{-5.1} f_m^2 + 0,114 f_m + 68, \quad (1)$$

де f_m – значення частоти в Гц. Ця функція точно ($R^2=1$) відповідає центру «хмари» статистичних даних.

Сукупність даних можна розглядати як сімейство парабол, кожна з яких відповідає певній чутливості

слуху. Але тоді високу вибірковість буде мати парабол, яка проходить по нижній межі наявних даних, а низьку – парабол, яка проходить по відповідній верхній межі.

Слід відзначити одну важливу особливість результатів експериментів – ширина розподілу даних по вертикальній осі зменшується із зменшенням частоти і зростає з її збільшенням. Звідси випливає, що відносно середньої параболі крайні повинні розходитися в області верхніх частот і сходитися в області нижніх частот.

З урахуванням усього сказаного і за допомогою того ж регресійного аналізу вдалося отримати функції для слуху низькою $\Delta Fl(f_m)$ і високої $\Delta Fh(f_m)$ чутливості [1]:

$$\Delta Fl(f_m) = 10^{-4.8} f_m^2 + 0,165 f_m + 78, \quad (2)$$

$$\Delta Fh(f_m) = 10^{-5.4} f_m^2 + 0,076 f_m + 58, \quad (3)$$

Вирази (1–3) дозволяють оцінити число і ширину частотних груп для випадку широкопasmового звукового сигналу для людей, що сприймають різний діапазон частот.

Результати розрахунку кількості груп широкопasmового сигналу для людей, що сприймають деякі з можливих частотних діапазонів, наведені в таблиці. Отримані результати добре узгоджуються з імовірнісним підходом до оцінки максимально чутного числа груп (порядку 30), що використовують експериментальні дані.

Результати та їх обговорення.

Викликана отоакустична емісія. Одним з нових методів об'єктивного дослідження слуху, який активно застосовується в аудіологічній практиці, є метод реєстрації сигналів отоакустичної емісії (ОАЕ), які генеруються структурами завивка внутрішнього вуха спонтанно або у відповідь на акустичну стимуляцію.

Таблиця 1. Кількість частотних груп для деяких частотних смуг

Діапазон частот, Гц	Різна чутливість слуху		
	низька	середня	висока
	Число частотних груп		
20 – 20000	–	–	36
30 – 15000	–	24	34
50 – 10000	14	22	31

Явище ОАЕ, яке покладено в основу методу, було відкрито в 1978 р. Девідом Кемпом; тому іноді сигнали ОАЕ називають на честь дослідника – “відлунням Кемпа” або “кохлеарним відлунням”.

У роботі [4] вперше було звернуто увагу на те, що викликана ОАЕ є імпульсною функцією (ІФ) середнього вуха і має форму, характерну для ідеального

фільтра з прямокутною АЧХ і нульовою або лінійною фазово-частотною характеристикою:

$$I\Phi(t) = \frac{\sin(\pi \Delta f(t - t_3))}{\pi \Delta f(t - t_3)} \cos(\omega_p(t - t_3)), \quad (4)$$

де Δf – ефективна смуга пропускання фільтра з резонансною частотою f_p посередині, а Δt – інтер-

вал часу між першими нулями огинаючої, і $\Delta f/\Delta t = 1$.

Використовуючи ІФ, в [4] були розраховані значення добротності $Q = f/\Delta f$. У діапазоні частот мовного діапазону 500 – 4000 Гц добротність практично залишається постійною $Q = 4,9 \div 5,3$. Це значення в 3,3 раза більше, ніж $Q \approx 1,5$, яке можна визначити з апроксимації залежності відносної амплітуди від частоти в дослідях Бекеш на ізольованих скроневих кістках в [5], що свідчить про наявність в завитку живого вуха активного механізму. Таким чином, використання імпульсної функції, викликані ОАЕ дає

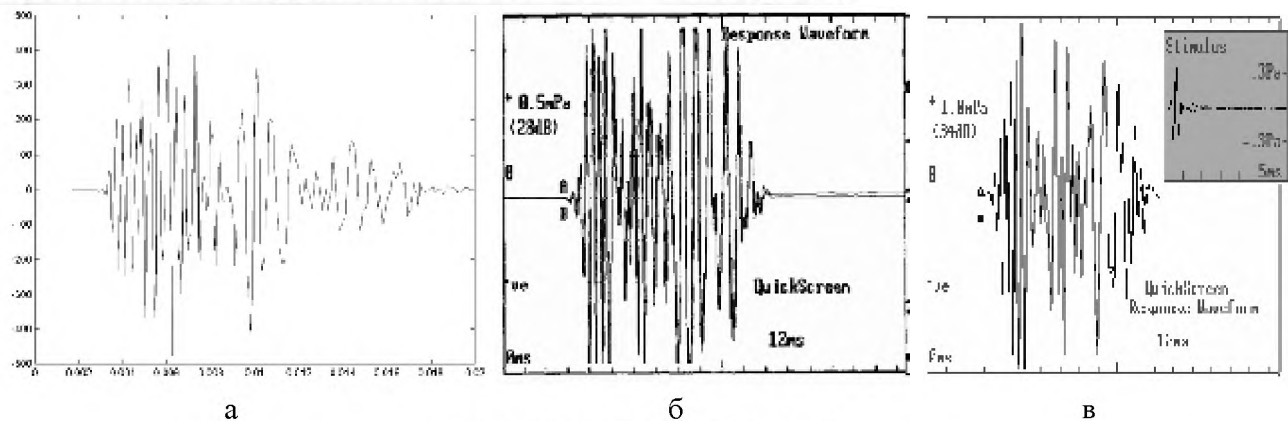


Рис. 3. Сигнали викликані ОАЕ.

Щоб обчислити ширину частотних груп за допомогою суб'єктивних методів, для сигналу викликані ОАЕ, показаного на рисунку 3а, скористаємося виразами (1–3). Значення частоти f_m в цих виразах обчислюється як $1/\Delta t$, де Δt – період з найбільшим значенням амплітуди: $f_{m1} = 2500$ Гц, $f_{m2} = 1500$ Гц.

Отже, ширина частотних груп для слуху низької $\Delta Fl(f_m)$, середньої $\Delta Fc(f_m)$ і високої $\Delta Fh(f_m)$ чутливості дорівнює:

1) для $f_{m1} = 2500$ Гц:

$$\Delta Fl(f_{m1}) = 10^{-4,8} f_m^2 + 0,165 f_m + 78 = 589,5 \text{ Гц};$$

$$\Delta Fc(f_{m1}) = 10^{-5,1} f_m^2 + 0,114 f_m + 68 = 402,65 \text{ Гц};$$

$$\Delta Fh(f_{m1}) = 10^{-5,4} f_m^2 + 0,076 f_m + 58 = 272,88 \text{ Гц};$$

2) для $f_{m2} = 1500$ Гц:

$$\Delta Fl(f_{m2}) = 10^{-4,8} f_m^2 + 0,165 f_m + 78 = 361,2 \text{ Гц};$$

$$\Delta Fc(f_{m2}) = 10^{-5,1} f_m^2 + 0,114 f_m + 68 = 256,9 \text{ Гц};$$

$$\Delta Fh(f_{m2}) = 10^{-5,4} f_m^2 + 0,076 f_m + 58 = 190 \text{ Гц}.$$

Для обчислення ширини частотних груп за допомогою об'єктивних методів необхідно знайти інтервал часу між першими нулями огинаючої (Δt) сигналу викликані ОАЕ. Величина, зворотна Δt , буде дорівнювати ширині частотних груп:

$$\Delta F_1 = 1/\Delta t = 1/0,0035 = 286 \text{ Гц};$$

$$\Delta F_2 = 1/\Delta t = 1/0,038 = 263 \text{ Гц}.$$

Аналогічні обчислення виконані для сигналів на рисунках 3 б, в.

новий об'єктивний експрес-метод для точного визначення ширини частотних груп і об'єктивний інваріантний параметр норми внутрішнього вуха, що, поряд з параметром норми середнього вуха [6], дозволить здійснювати скринінг слуху новонароджених та моніторинг функціонального стану вуха [4].

Порівняльний аналіз ширини частотних груп, отриманої суб'єктивними і об'єктивними методами діагностики слуху людини. Для аналізу використовуємо сигнали викликані ОАЕ, експериментально отримані у обстежуваних, які чувають нормально (рис. 3).

Для сигналу на рисунку 3б: $f_{m1} = 2500$ Гц, $f_{m2} = 1428$ Гц.

Отже ширина частотних груп для слуху низької $\Delta Fl(f_m)$, середньої $\Delta Fc(f_m)$ і високої $\Delta Fh(f_m)$ чутливості дорівнює:

1) для $f_{m1} = 2500$ Гц:

$$\Delta Fl(f_{m1}) = 10^{-4,8} f_m^2 + 0,165 f_m + 78 = 589,5 \text{ Гц};$$

$$\Delta Fc(f_{m1}) = 10^{-5,1} f_m^2 + 0,114 f_m + 68 = 402,65 \text{ Гц};$$

$$\Delta Fh(f_{m1}) = 10^{-5,4} f_m^2 + 0,076 f_m + 58 = 272,88 \text{ Гц};$$

2) для $f_{m2} = 1428$ Гц:

$$\Delta Fl(f_{m2}) = 10^{-4,8} f_m^2 + 0,165 f_m + 78 = 346 \text{ Гц};$$

$$\Delta Fc(f_{m2}) = 10^{-5,1} f_m^2 + 0,114 f_m + 68 = 247 \text{ Гц};$$

$$\Delta Fh(f_{m2}) = 10^{-5,4} f_m^2 + 0,076 f_m + 58 = 147,7 \text{ Гц}.$$

Ширина частотних груп, що обчислена за допомогою об'єктивних методів:

$$\Delta F_1 = 1/\Delta t = 1/0,0025 = 400 \text{ Гц};$$

$$\Delta F_2 = 1/\Delta t = 1/0,0041 = 243,9 \text{ Гц}.$$

Для сигналу на рисунку 3, в: $f_{m1} = 2500$ Гц, $f_{m2} = 1350$ Гц.

Отже ширина частотних груп для слуху низької $\Delta Fl(f_m)$, середньої $\Delta Fc(f_m)$ і високої $\Delta Fh(f_m)$ чутливості дорівнює:

1) для $f_{m1} = 2500$ Гц:

$$\Delta Fl(f_{m1}) = 10^{-4,8} f_m^2 + 0,165 f_m + 78 = 589,5 \text{ Гц};$$

$$\Delta Fc(f_{m1}) = 10^{-5,1} f_m^2 + 0,114 f_m + 68 = 402,65 \text{ Гц};$$

$$\Delta Fh(f_{m1}) = 10^{-5,4} f_m^2 + 0,076 f_m + 58 = 272,88 \text{ Гц};$$

2) для $f_{m2} = 1350$ Гц:

$$\Delta Fl(f_{m2}) = 10^{-4.8} f_m^2 + 0,165 f_m + 78 = 329 \text{ Гц};$$

$$\Delta Fc(f_{m2}) = 10^{-5.1} f_m^2 + 0,114 f_m + 68 = 240 \text{ Гц};$$

$$\Delta Fh(f_{m2}) = 10^{-5.4} f_m^2 + 0,076 f_m + 58 = 168 \text{ Гц}.$$

Ширина частотних груп, що обчислена за допомогою об'єктивних методів:

$$\Delta F_1 = 1/\Delta t = 1/0,0028 = 357,1 \text{ Гц};$$

$$\Delta F_2 = 1/\Delta t = 1/0,0032 = 312,5 \text{ Гц}.$$

Отже, смуга $\Delta f_1 = 1/\Delta t$ (Δt – інтервал часу між нулями імпульсної функції ВОАЕ), збігається з шириною частотних груп, виміряних за суб'єктивною оцінкою гучності смугового шуму.

Висновки. 1. Залежність $\Delta f = 1/\Delta t$ від f_p , що виз-

начена за сигналом затриманої ОАЕ, кількісно збігається з середньою залежністю (людей з різною чутливістю) ширини частотних груп, виміряної за суб'єктивною оцінкою гучності шуму в смузі частот, апроксимація якої описується співвідношенням (1–3).

2. Розділення спектра звуку на частотні інтегруючі групи відбувається в завитку внутрішнього вуха.

3. Використання ІФ викликаної ОАЕ дає новий об'єктивний метод для точного визначення ширини частотних груп і об'єктивний інваріантний параметр норми внутрішнього вуха, що дозволяє доповнити скринінг слуху новонароджених і здійснювати моніторинг функціонального стану вуха.

Література

1. Стефанова И. А. Аппроксимация основных характеристик слухового анализатора / И. А. Стефанова // Акустический журнал. – 2003. – № 2. – С. 245–249.
2. Вахитов Я. Ш. Теоретические основы электроакустики и электроакустическая аппаратура / Я. Ш. Вахитов. – М. : Искусство, 1982. – 415 с., ил.
3. Ухо как приемник информации / Цвикер Э., Фельдкеллер Р. : пер. с немец.; под ред. Б. Г. Белкина. – М. : Связь, 1971. – С. 255.
4. Найда С. А. Отоакустическая эмиссия – импульсная функция уха; ключ к оптимальному кодированию звука в улитковом имплантате / С. А. Найда // Доповіді національної академії наук України. – 2005. – № 5. – С. 174 – 180.
5. Фланеган Дж. Л. Анализ, синтез и восприятие речи : пер. с англ. ; под ред. А. А. Пирогова. – М. : Связь, 1968. – 394 с.
6. Найда С. А. Формула середнього вуха людини в нормі. Відбивання звуку від барабанної перетинки / С. А. Найда // Акустичний вістник. – 2002. – № 3. – С. 46–51.